

## 敦煌雅丹地层沉积物粒度特征初步研究

梁晓磊<sup>1</sup>, 翟晓慧<sup>1</sup>, 牛清河<sup>2</sup>, 胡子豪<sup>3</sup>, 王天虎<sup>4</sup>, 刘万成<sup>4</sup>

(1. 太原师范学院管理系, 山西 晋中 030619; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院敦煌戈壁荒漠研究站/甘肃省风沙灾害防治工程技术研究中心/中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 敦煌市雅丹景区服务中心, 甘肃 酒泉 736200)

**摘要:** 雅丹地层是雅丹地貌发育前整个沉积体系的物质体现, 记录了沉积过程中的大量信息, 而沉积物分析则是解读其关键信息的基础。以敦煌雅丹地貌为研究对象, 对其出露地层的沉积物粒度特征进行了初步研究。结果表明: (1) 敦煌雅丹地层沉积物粒径组成以粉沙为主, 平均含量分别为 41.08%(YA)、36.82%(YB) 和 35.41%(YC), 自东向西含量递减, 并含有较高比重的粗沙组分, 空间变化趋势与粉沙相反。(2) 雅丹地层沉积物粒径组成和粒度参数纵向变化特征显著, 剖面沉积段物质以粗(中沙、细沙为主)细(粉沙、黏土为主)旋回变化为特征, 交界面与雅丹三级阶梯相吻合。(3) 雅丹地层是不同沉积环境和动力机制下形成的多种沉积物混杂堆积的结果, 主要为风成、河流和湖泊环境交替沉积的结果, 其中河流与湖泊沉积环境的亚环境类型更是复杂多样, 有待进一步的深入研究。

**关键词:** 雅丹地层; 沉积物; 粒度分析; 粒度频率分布曲线; 粒度参数

文章编号:

粒度成分是分布最广泛的一种沉积特征, 受搬运介质、搬运方式和沉积环境等因素的控制, 从而产生不同的粒度组成和分布模式<sup>[1]</sup>。沉积物的粒度组成不仅可以反映沉积环境特征, 而且还可以用于表征地表动力过程的强度。因此, 粒度分析作为确定物质沉积环境、动力机制和发育过程的基本标准参数, 已被广泛应用于风成地貌研究<sup>[2-4]</sup>, 并已证明应用效果良好, 但在雅丹地貌研究<sup>[5-8]</sup>中应用较少。

雅丹地层, 即雅丹沉积层, 是不同地质时期所形成的层状岩石, 这里主要指地层堆积物在地表的体现, 具有明显的层序结构, 由数量不等、厚度差异性显著的沉积层组成, 其沉积结构以坚硬、胶结的水成沉积层和松软的风积层交替沉积为特征<sup>[3,9]</sup>。目前, 关于雅丹地层的研究仍以定性描述为主, 多集中于对沉积相和沉积环境的解读<sup>[10-13]</sup>, 亟待开展深入的定量研究。敦煌雅丹地貌规模大, 分布相对集中, 相层序结构特征明显, 其顶部常覆盖有厚 30~

80 cm 左右的洪积相戈壁砾石层, 是为雅丹地层侵蚀开始前的末次沉积层<sup>[14]</sup>, 因而保存有完整的地层层序结构, 是雅丹沉积地层研究的理想场所。此外, 相关学者对敦煌雅丹地层沉积物的地球化学元素组成<sup>[15-16]</sup>和重矿物组成<sup>[17]</sup>等理化特征进行了初步研究, 而在粒度分布特征方面有所不足。

本文依据野外调查与实验分析结果, 重点分析雅丹地层沉积物的粒度组成特征, 并以此为基础对其空间差异性和沉积环境类型进行探讨, 为雅丹地层形成、演化和动力条件分析提供基础数据资料。

## 1 研究区概况

敦煌雅丹世界地质公园(以下简称雅丹地质公园)位于河西走廊西端, 安西-敦煌盆地西缘, 距敦煌市区西北向约 160 km(图 1a)。行政区划上, 地处新疆、甘肃交界处, 地理位置为 40°25'36"~40°33'10"N、

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42001007); 国家自然科学基金(42171016)资助

作者简介: 梁晓磊(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事风沙地貌等方面的研究。E-mail: liangxl@lzb.ac.cn

通讯作者: 翟晓慧(1984-), 女, 讲师, 主要从事干旱区沙漠化等方面的研究。E-mail: zhaixiaohui@lzb.ac.cn

90°00'00"~93°13'30"E, 公园东西长约25 km, 南北宽约13 km, 总面积为346.34 km<sup>2</sup>。园区东、北向与北山山前冲洪积倾斜平原紧密相连; 南邻敦煌西湖国家级自然保护区(以下简称西湖湿地), 古称哈拉奇湖, 是为疏勒河终端, 疏勒河古道自东向西南横穿湿地, 与地质公园相距约20 km; 西南为库姆塔格沙漠, 雅丹地貌与沙漠东部区域相重叠; 西、西北向与阿奇克谷地和近南北走向的三垄沙相邻。雅丹地质公园地处欧亚大陆腹地, 远离海洋, 属于典型的暖温带极端干旱气候, 干燥度在30以上, 气候干旱, 降水稀少(年平均降水量14.99 mm)且年际变化大, 潜在蒸发量大, 光照充足, 太阳辐射强烈, 季节和昼夜温差大(年平均温度11.5℃), 无霜期短, 大风日数多(年平均风速3.11 m·s<sup>-1</sup>), 沙尘暴活动频繁(气象数据来自若羌县)<sup>[11,18]</sup>。

## 2 研究方法

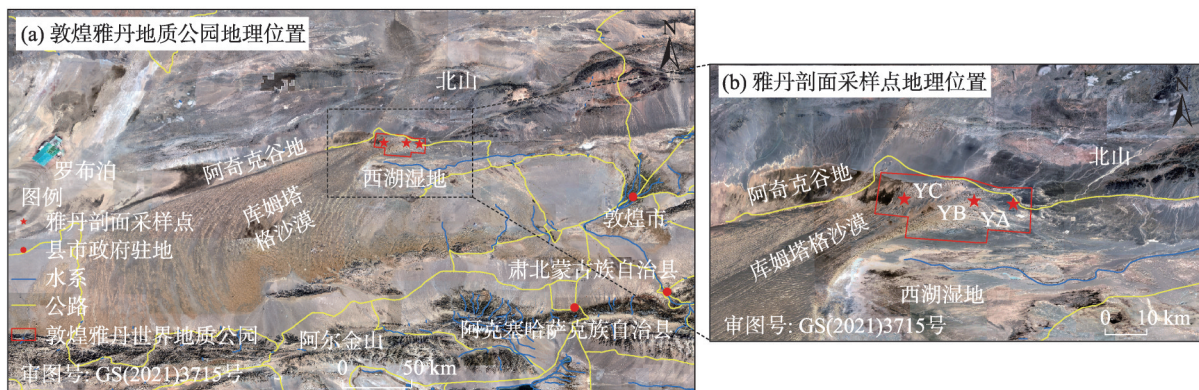
### 2.1 样品采集

为反映雅丹地层沉积物粒度特征的空间差异性, 我们在同纬度上自东向西选取了3个完整的雅丹体作为采样对象, 样品编号分别记为YA、YB和YC, 其中雅丹YA剖面由两部分组成, 分别是地上雅丹体部分和相邻的机械开挖的地下沉积层部分(图2a)。剖面YA坐标为40°29'26.83"N、93°14'29.63"E, 高程902 m, 其长、宽、高分别约为117 m、69 m和27 m, 形态表现为三级阶梯状, 交界面分别位于9 m和17 m附近; 剖面YB坐标为40°29'50.59"N、93°09'24.92"E, 高程843 m, 其长、宽、高分别约为67 m、19 m和13.7

m, 形态表现为三级阶梯状, 交界面分别位于6 m和10 m附近(图2b); 剖面YC坐标为40°30'5.14"N、93°00'24.84"E, 高程816 m, 其长、宽、高分别约为75 m、43 m和24 m, 形态表现为三级阶梯状, 交界面分别位于8 m和16 m附近(图2c)。按照自上而下逐层取样的原则, 每层采集3个不同位置的样品, 然后对样品进行均匀混合后所得到的样品即是代表这一雅丹地层的沉积物样品。根据以上方法, 我们共采集了336个样品, 经混合提取后, 最终获得112个雅丹沉积物研究样品, 其中雅丹YA、YB、YC样品数量分别为49、23、40个。

### 2.2 测试与分析

沉积物粒度测试在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。样品前处理过程采用Zhao等研究中的方法<sup>[19]</sup>, 首先, 将10 mL配制好的浓度为30%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>加入到含有1.5 g原始样品的烧杯中以除去有机物质, 然后在通风柜内将烧杯放到电热板上加热, 缓慢反应至溶液变清且无细小泡沫产生时, 加入10 mL浓度为10%的盐酸溶液加热约10 min以除去碳酸盐。接下来向处理好的样品溶液中注满蒸馏水, 并静置24 h。待样品静置结束后, 将烧杯上层清液抽出, 加入10 mL配制好的(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> (0.05 g·L<sup>-1</sup>) 并放入超声波清洗器中震荡约10 min。最后, 将样品转移到激光粒度分析仪中, 以体积百分比形式测量。每个样品测量3次并取平均值, 结果表明重复测量的误差通常小于0.1%。实验设备包括, Master-sizer 2000激光粒度仪、Hydro 2000G湿法分散系统、氦-氟气体激光光源(0.632 μm)和蓝光辅助光源



注: YA、YB和YC为样品编号。

图1 敦煌雅丹地质公园及样品采集点地理位置示意图

Fig. 1 Locations of Dunhuang Yardang Geo-park and the sampling points



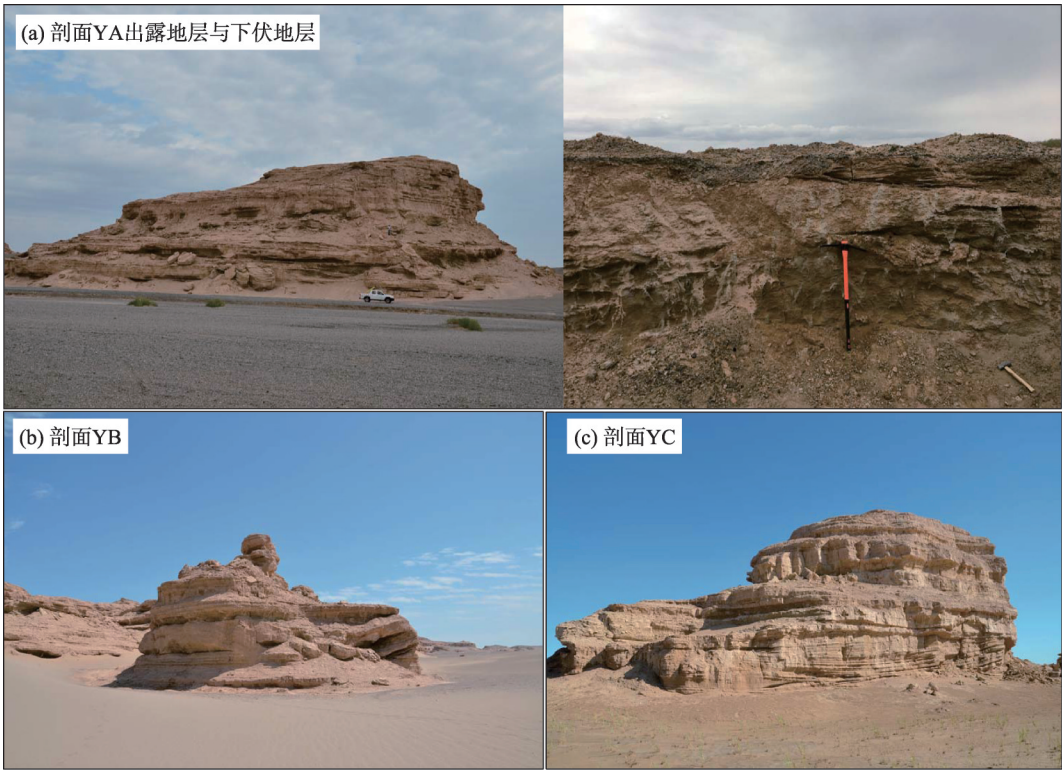


图2 雅丹形态与剖面特征  
Fig. 2 Morphological and profile characteristics of yardang

(0.466  $\mu\text{m}$ ),其测量范围为0.02~2000  $\mu\text{m}$ ,具有100个粒径等级。

将数学统计方法引入粒度数据分析<sup>[20-21]</sup>,可统计出平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $\delta_1$ )、偏度( $SK_1$ )和峰度( $K_G$ )4个参数,用于直观反映沉积物粒度分布模式,具体计算公式为:

$$M_z = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3 \quad (1)$$

$$\delta_1 = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/4 + (\Phi_{95} - \Phi_5)/6.6 \quad (2)$$

$$SK_1 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_{25})} \quad (3)$$

$$K_G = (\Phi_{95} - \Phi_5)/2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25}) \quad (4)$$

式中: $\Phi_5$ 、 $\Phi_{16}$ 、 $\Phi_{25}$ 、 $\Phi_{50}$ 、 $\Phi_{75}$ 、 $\Phi_{84}$ 、 $\Phi_{95}$ 分别为粒度分布的相应分位数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 粒级级配

基于SPSS软件统计分析,敦煌雅丹地层沉积物粒级级配分布特征如图3a~c所示,各粒级含量参数详见表1。在各剖面中极粗沙含量分别占整体的0.01%(YA)、0.33%(YB)和0.87%(YC),由于其不足1%,因此在统计中将其并入粗沙含量中。所有剖面

均以粉沙组分为主,且平均含量较为接近,分别为41.08%(YA)、36.82%(YB)和35.41%(YC),自东向西(YA-YB-YC)粉沙含量逐渐减少,空间差异性特征显著。粗沙含量普遍较低,但在剖面YC中含量远多于其他剖面,平均值达9.98%,剖面间自东向西平均含量值逐渐升高,变化特征与粉沙含量相反。

黏土作为沉积物中最细的物质组分,属于与黄土和沙尘暴相关的悬移组分,或代表了湖泊沉积物中的远岸悬移组分<sup>[22]</sup>。根据野外调查可知,剖面中黏土层沉积物胶结性较好,质地坚硬,且沉积厚度普通在50 cm以上,或可作为湖心静水沉积环境的有效代用指标。剖面YC中黏土含量高于其他剖面,平均值为18.33%,剖面YA、YB间含量较为接近,分别为14.69%和12.13%。在各粒级含量比重方面:剖面YA依次为粉沙>细沙>黏土>中沙>极细沙>粗沙;剖面YB与YA较为接近,为粉沙>细沙>极细沙>中沙>黏土>粗沙;剖面YC差异性较大,依次为粉沙>黏土>中沙>细沙>粗沙>极细沙。此外,根据温德华粒级标准,粉沙可进一步细分为粗粉沙、中粉沙、细粉沙与极细粉沙。对雅丹沉积物粉沙组分中各粒级的含量进行统计分析,其归一化结果如图

chinaXiv:202201.00083v1

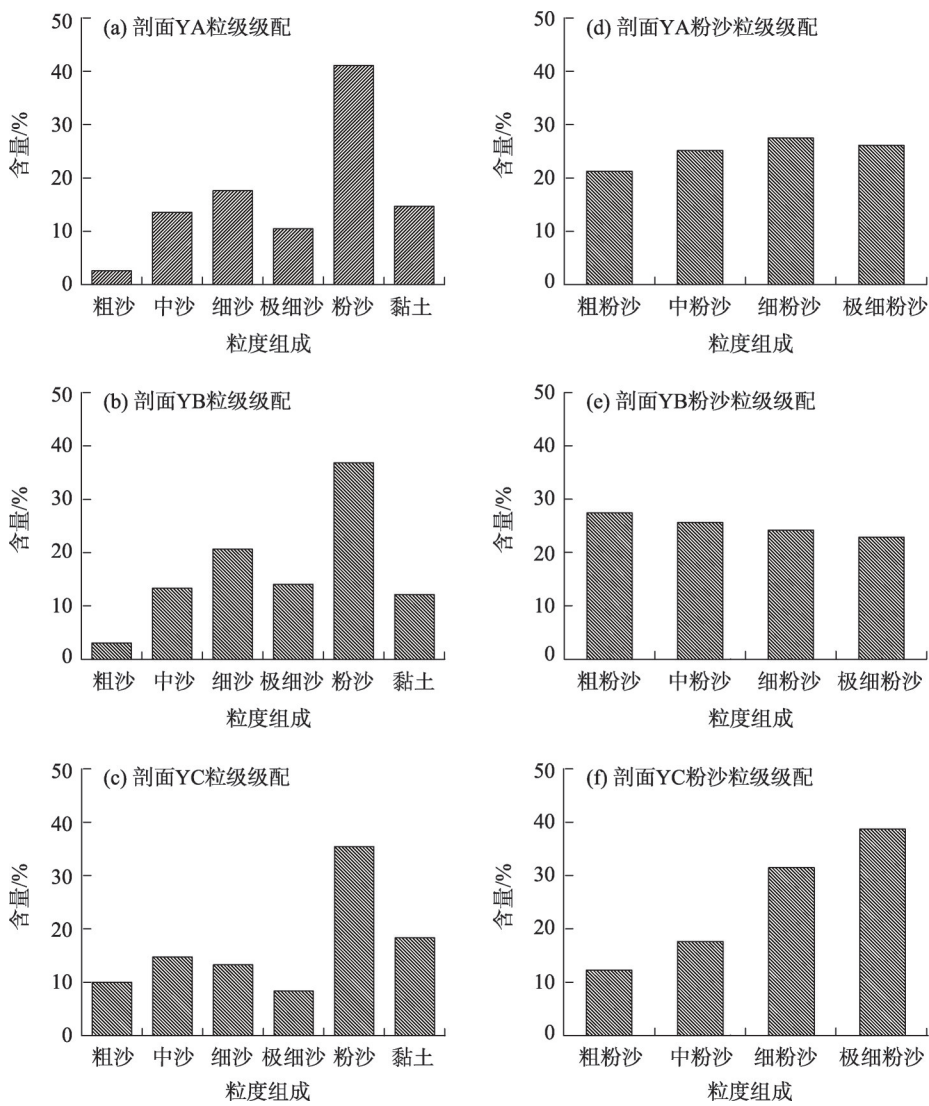


图3 敦煌雅丹地层沉积物粒度组成特征

Fig. 3 Grain-size composition of sediments in Dunhuang yardang strata

表1 雅丹剖面沉积物粒度组成

Tab. 1 Grain-size composition of sediments from yardang profiles

样品		黏土 ( $<3.9\ \mu\text{m}$ )	粉沙 ( $3.9\sim62.5\ \mu\text{m}$ )	极细沙 ( $62.5\sim125\ \mu\text{m}$ )	细沙 ( $125\sim250\ \mu\text{m}$ )	中沙 ( $250\sim500\ \mu\text{m}$ )	粗沙+极粗沙 ( $500\sim2000\ \mu\text{m}$ )
剖面YA	平均值	14.69	41.08	10.51	17.60	13.53	2.60
	最小值	0.32	3.11	0.00	0.00	0.00	0.00
	最大值	51.56	85.16	41.94	53.93	54.98	37.40
	变异系数	1.11	0.76	1.10	1.16	1.36	2.62
剖面YB	平均值	12.13	36.82	14.04	20.66	13.31	3.03
	最小值	0.63	3.01	0.10	0.00	0.00	0.00
	最大值	58.10	84.43	40.34	57.42	48.65	19.35
	变异系数	1.25	0.81	0.90	0.97	1.28	1.75
剖面YC	平均值	18.33	35.41	8.32	13.23	14.73	9.98
	最小值	0.94	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00
	最大值	59.50	83.38	36.57	54.42	44.20	40.25
	变异系数	1.03	0.83	1.08	1.18	1.13	1.42

3e~f所示,剖面YA与YC具有相似性,由粗粉沙向极细粉沙含量递增,其中YC剖面粒级跨度较大,而剖面YB则与之相反,由粗粉沙向极细粉沙含量递减。

根据以上研究结果可以发现,敦煌雅丹与察尔汗盐湖雅丹和白龙堆雅丹沉积物粒度特征研究结果相差较远,虽然沉积物组成都是以粉沙为主,但察尔汗盐湖和罗布泊雅丹粉沙的平均含量分别高达69.26%和80.05%,占有绝对的主导作用,并且察尔汗盐湖雅丹中不含有粗沙组分,粒级含量变化依次为:粉沙>细沙>中沙和黏土>极细沙<sup>[6,23]</sup>,形成这一差异的原因可能与敦煌雅丹地貌具有更加复杂的搬运、沉积过程有关。

除空间差异外,雅丹地层沉积物不同粒径颗粒含量纵向变化特征同样显著。图4所示为剖面YA样品中不同粒径颗粒含量随高度变化的分布曲线,根据所有曲线波动特征,可以将剖面YA自下而上划分为5个波动段,其中段Ⅰ(YA29~YA49)整体以粉沙和黏土为主,平均含量分别为47.46%和18.56%,其余组分含量较低甚至为零,粗沙在7.20 m处有一小峰,中沙、细沙和极细沙含量在-0.69 m、

0.98 m、5.14 m和7.20 m表现出4个明显的峰值;段Ⅱ(YA23~YA28)中以中沙和细沙为主,平均含量为34.13%和28.84%,粗沙在9.16 m处有一小峰,峰值为37.40%,极细沙、粉沙和黏土在11.58 m处表现不同程度峰值特征,其值分别为25.47%、63.22%和7.21%;段Ⅲ(YA17~YA22)中以粉沙和黏土为主,表现出波动增大的特征,平均含量为68.24%和25.25%,粗沙、中沙和细沙含量几乎为零,极细沙在0.17%~8.33%间波动减少;段Ⅳ(YA10~YA16)中以中沙和细沙为主,平均含量为27.98%和36.47%,粗沙含量变化表现为一峰两谷,峰值为24.04%,极细沙为三峰两谷,自下而上峰值为29.36%、19.47%和38.02%,粉沙和黏土也是一峰两谷特征,峰值分别为67.62%和31.96%;段Ⅴ(YA01~YA09)以粉沙和黏土为主,平均含量为45.77%和13.81%,所有粒径含量变化表现出两峰三谷特征,旋回变化明显。这一结果表明,以沉积物颗粒结构为特征,剖面YA中5个沉积段间表现为粉沙-黏土段和中沙-细沙段旋回变化特征,其中段Ⅰ与段Ⅲ顶部交界面分别位于9 m和18 m附近,这与雅丹YA三级阶梯状形态的交界面位置基本一致,指示了彼此间可能具有成因

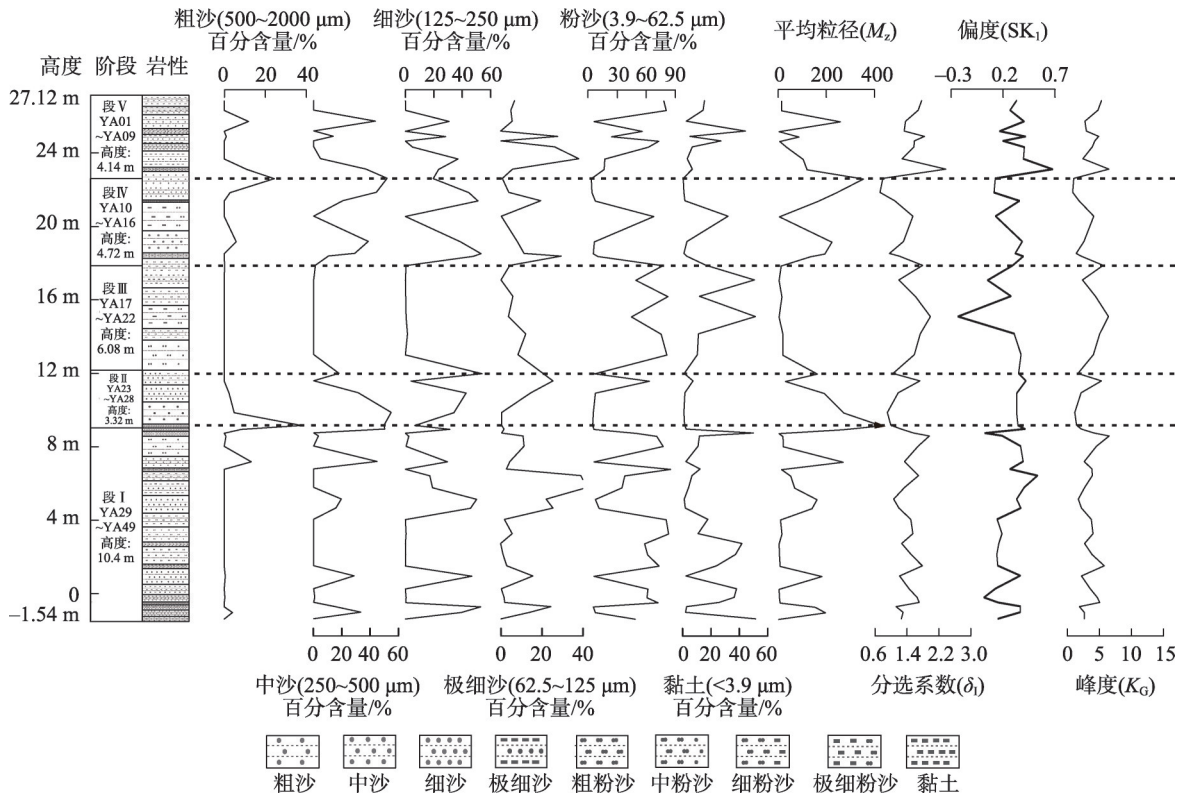


图4 剖面YA中不同粒径颗粒含量与粒度参数随高度变化曲线  
Fig. 4 Variations of grain-size particles and parameters in the profile YA with height



联系。

同样的,剖面YB与YC样品中不同粒径含量随高度变化的分布曲线同样具有起伏变化特征(图5)。根据曲线波动特征,尤其是中沙、细沙、粉沙和黏土含量曲线,剖面YB可以划分为4个沉积段(图5a),其中,段I、Ⅲ、Ⅳ中整体以细沙和粉沙为主,两者含量和在50%以上,段Ⅱ以粉沙和黏土为主,平均含量分别为49.17%和32.24%。剖面YC也可以划分为4个沉积段(图5b),段I、Ⅱ、Ⅳ中整体以粉沙

和黏土为主,两者含量和在50%以上,段Ⅲ中粉沙、中沙和粗沙含量较高,平均含量分别为23.71%、22.20%和16.56%。尽管剖面YB与YC中旋回特征不明显,但段间交界面与三级阶梯状形态的交界面位置仍具有较好的对应关系。

关于敦煌雅丹地貌三级阶梯状形态特征,Wang等将其解释为三级河流阶地,由3次不同时期的构造抬升所形成<sup>[24]</sup>。而以上分析结果表明,雅丹地层沉积段之间的交界面与三级阶梯交界面位置有很

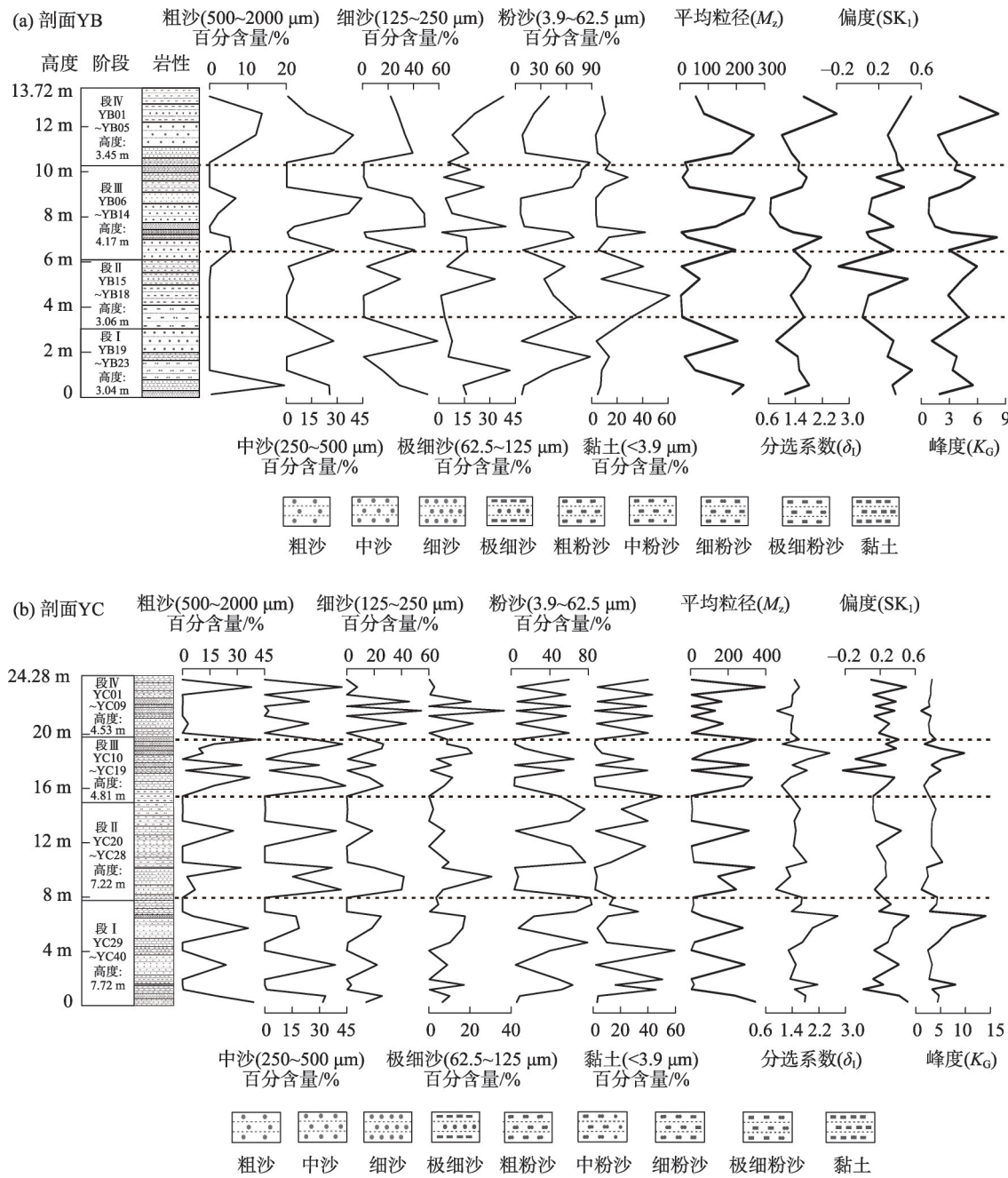


图5 剖面YB、YC中不同粒径颗粒含量与粒度参数随高度变化曲线

Fig. 5 Variations of grain-size particles and parameters in the profile YB and YC with height

好的对应关系,因此,沉积段之间的差异性侵蚀过程可能是形成三级阶梯状形态特征的重要原因。

3.2 粒度频率分布曲线

频率曲线是沉积物粒度分布的一种直观的视觉显示。沉积物颗粒由于物质性质和搬运营力的差异性往往经历不同程度的蠕移、跃移和悬移过程,从而形成不同的频率曲线。换句话说,不同沉积环境下形成的粒度分布特征明显不同<sup>[25-26]</sup>。图6a~c所示为雅丹地层沉积物粒度分布曲线,各剖面中曲线混杂分布,彼此间相互重叠,反映了样品间粒度分布特征的差异性。在剖面YA样品的频率曲线中,峰值介于3~450 μm,并且峰值排列表现出较

好的连续性,指示了沉积物类型的多样性。曲线形态以单峰占主导地位,包括窄单峰和平滑单峰两种形态,其中窄单峰峰值约介于100~450 μm之间,物质较粗,而平滑单峰峰值则较细,约介于5~50 μm之间,此外,还有少量双峰曲线,但次峰特征不明显。剖面YB样品的频率曲线特征与YA相似,同样表现为窄单峰与平滑单峰两端集聚的特征,峰值介于4~300 μm,峰值连续性在10 μm附近有所空缺。相比较而言,剖面YC样品的频率曲线特征较为混乱,峰值介于3~600 μm,并且相对集中在2个粒径范围内,分别为3~7 μm和200~600 μm,峰值连续性较差。曲线形态包含有窄单峰、平滑单峰和不对称双

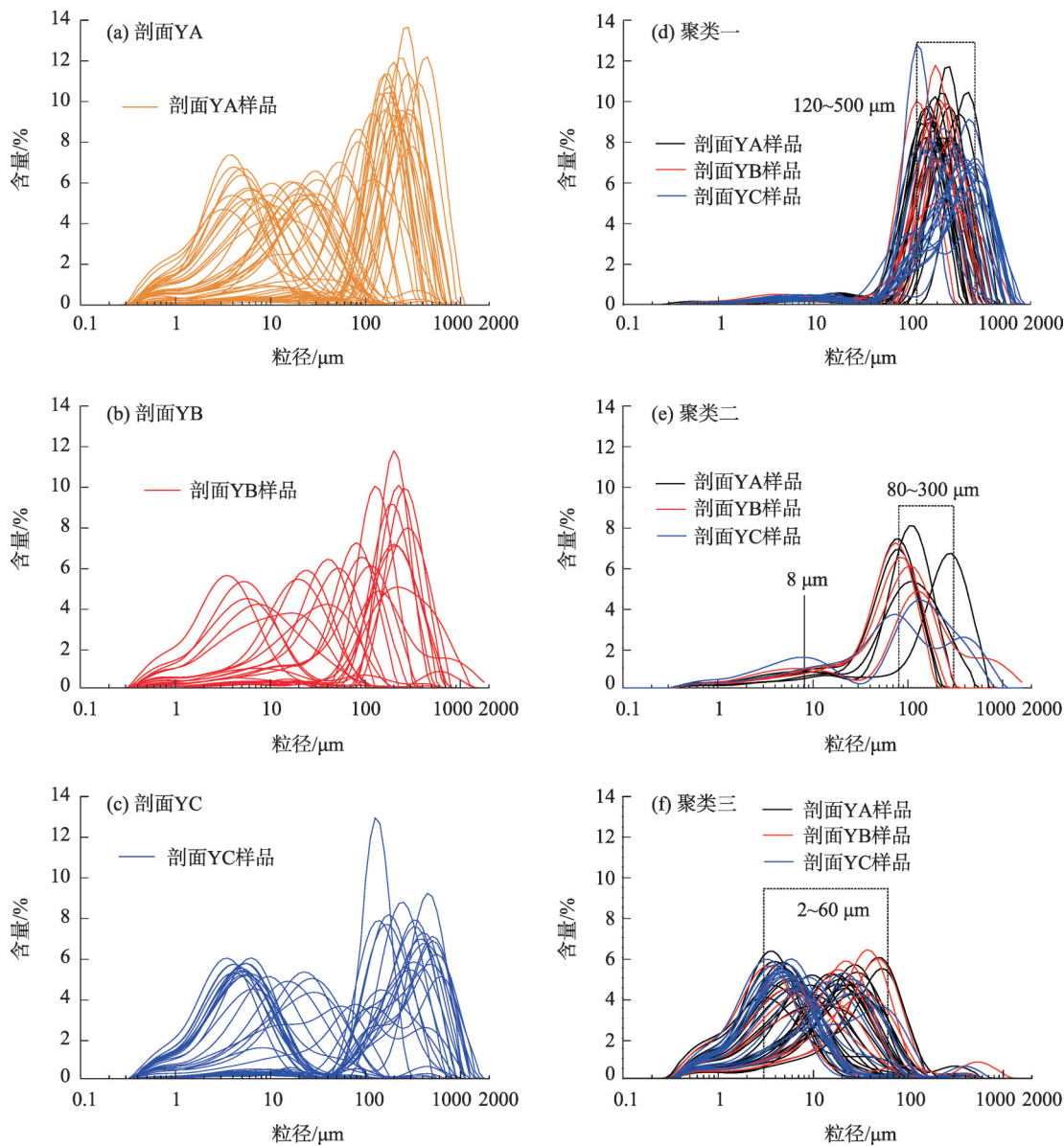


图6 雅丹沉积物样品与聚类结果样品粒度频率曲线

Fig. 6 Grain-size frequency curves of yardang and clustering result samples

峰等形态特征,平滑单峰曲线峰值多聚焦于3~30  $\mu\text{m}$  左右,窄单峰与不对称双峰重叠于粒径较大区域。

3.3 粒度参数

将数学统计方法引入粒度数据分析,雅丹剖面沉积物粒度参数运算结果如表2所示。整体上,平均粒径值较为接近,仅剖面YC中由于粗沙含量较高,平均粒径值高达126.90  $\mu\text{m}$ 。分选系数反映了粒径的分散程度,分选系数越小,粒径分布越集中,反之就越分散,根据Folk等<sup>[20]</sup>粒度参数分级标准,雅丹地层沉积物平均分选系数介于1.38~1.45之间,分选性较差。偏度与峰度是频率曲线对称性与尖窄程度的直观反映,剖面YA、YB与YC偏度平均值介于0.24~0.28之间,表现为正偏,平均峰度值均>3.00,在分级标准上为非常窄。据此可知,在粒度参数平均值方面,雅丹剖面间较为接近,空间差异性特征不明显,然而在样品间却不尽相同,差异性显著。分选系数介于0.64~2.64之间,分选性从较好、中等、较差到很差跨度较大;偏度值波动于-0.23~0.68,指示了样品频率曲线具有负偏、近对称、正偏与极正偏等多种对称特征;峰度值介于0.75~14.00之间,曲线尖窄程度由宽到窄,甚至是非常窄,多样性显著。

基于以上样品间粒度参数的差异性特征,本文还对雅丹地层间沉积物粒度参数特征值随高度的变化特征进行了深入分析,其变化特征如图4、图5所示。根据粒度参数曲线起伏波动特征,同样可以将雅丹地层合并为4个或5个沉积段,与不同粒径颗粒含量曲线划分结果相吻合。

3.4 沉积环境分析

根据上述对雅丹沉积物粒级组成的分析结果可知:雅丹沉积物以粉沙为主,中沙、细沙和黏土同样占有较高比重;沉积层物质具有明显的粗(中沙、细沙为主)细(粉沙、黏土为主)旋回变化特征。在物质搬运过程中,粉沙和黏土为悬移组分多指向湖泊沉积环境,细沙多为风力或流水的近源搬运组分,指向风成与河流沉积环境,而中沙则多与地表的冲积过程有关。因此,我们选取粗(中沙和细沙,125~500  $\mu\text{m}$ )细(粉沙和黏土,<62.5  $\mu\text{m}$ )两组环境敏感组分作为沉积环境判别指标对雅丹沉积环境类型进行提取。如图7a所示,雅丹沉积物散点集聚特征明显,可划分为3组集聚区,表明具有3种典型的沉积环境类型,分别记作聚类一、聚类二和聚类三。基于不同粒度组分对沉积环境的指示意义:聚类一,粉沙和黏土含量低于20%,中沙和细沙含量较高,可能为风成沉积环境或冲积环境;聚类三,粉沙和黏土含量高于60%,而中沙和细沙含量低于20%,可能为湖泊沉积环境;聚类二,介于前述两者之间,依据环境敏感组分难以有效识别。

与已知不同环境沉积物的对比分析是另一种表征沉积环境的有效方法<sup>[27-28]</sup>。相关研究成果表明:不同沉积环境下的物质在频率曲线的形态和峰值方面具有差异性表现特征,其中河流沉积物通常由粗细两组组分组成,塔里木河、黑河与石羊河沉积物的峰值粒径范围分别为80~400  $\mu\text{m}$ 和5~10  $\mu\text{m}$ <sup>[29-30]</sup>;风成沉积物为单峰式分布,分选性极好,巴丹吉林沙漠与科尔沁沙地的风成沙粒径的峰值范围为200~300  $\mu\text{m}$ <sup>[31-33]</sup>,库姆塔格沙漠风成沙峰值粒径在250

表2 雅丹剖面沉积物粒度参数

Tab. 2 Grain size parameters of sediments from yadang profiles

样品		平均粒径( $M_z$ )/ $\mu\text{m}$	分选系数( $\delta_i$ )	偏度( $SK_i$ )	峰度( $K_G$ )
剖面YA	平均值	97.20	1.38	0.28	3.39
	最小值	3.66	0.64	-0.23	0.75
	最大值	430.00	2.36	0.68	6.53
	变异系数	1.13	0.25	0.56	0.46
剖面YB	平均值	99.50	1.45	0.28	3.74
	最小值	3.21	0.66	-0.18	0.81
	最大值	260.00	2.63	0.51	8.24
	变异系数	0.96	0.32	0.63	0.55
剖面YC	平均值	126.90	1.43	0.24	3.89
	最小值	3.17	0.78	-0.23	1.05
	最大值	400.00	2.64	0.52	14.00
	变异系数	1.09	0.26	0.66	0.61

chinaXiv:202201.00083v1



$\mu\text{m}$ 左右,少数出现在  $500\ \mu\text{m}$ <sup>[34]</sup>;湖泊沉积物曲线类型复杂,分选性差,不同地区或不同湖泊沉积物的粒度频率曲线差异性显著,但从湖岸向湖心的趋势是一致的,即峰值粒径逐渐减小,从湖岸到过渡(湖岸向湖心)再到湖心其峰值范围分别为  $70\sim 100\ \mu\text{m}$ 、 $10\sim 70\ \mu\text{m}$  和  $2\sim 10\ \mu\text{m}$ <sup>[31,35-37]</sup>。图 6e~f 所示为 3 组聚类样品的粒度频率分布曲线,聚类一以极窄单峰形态为主,峰值粒径介于  $120\sim 500\ \mu\text{m}$  之间,部分曲线于  $8\ \mu\text{m}$  处有一细尾,特征不明显,这与上述沙漠物质和河流沉积物具有极高的相似性。聚类二表现为不对称双峰形态,主峰峰值粒径范围为  $80\sim 300\ \mu\text{m}$ ,次峰特征较弱,峰值粒径在  $8\ \mu\text{m}$  左右,表明该类样品为典型河流沉积物。在干旱地区,经风化作用的干河床沉积物与沙漠物质在粒度分布上具有极大相似性,但可以通过其细物质组分含量和较差的分选特征来区别于风成沉积物<sup>[38]</sup>。聚类三以平滑单峰为主,峰值粒径范围为  $2\sim 60\ \mu\text{m}$ ,并具有显著

的过渡特征,表明该类样品为湖泊沉积物。由此可知,雅丹地层沉积环境复杂多样,并非是简单的河湖相交替沉积过程,具有典型的湖泊、河流和风成沉积环境,河流与湖泊沉积环境的亚环境类型更是复杂多样,亟待开展深入研究。

粒度统计参数的散点图可用于反映沉积特征的差异性以及表征沉积环境,本文引入雅丹地层样品粒度参数数据以进一步论证沉积环境分析结果。如图 7b~d 所示,平均粒径与分选系数和峰度不存在显著的相关关系,与偏度呈弱相关,相关系数为 0.40;在区分不同组分方面,聚类一和聚类三样品差异性显著且散点的集聚特征明显,聚类二在分选系数和峰度指标图中离散程度较高,不易识别,但在偏度指标图中聚集效果良好。因此,粒度参数指标可以作为雅丹沉积环境类型提取的有效指标,尤其在平均粒径与偏度散点图(图 7c)中识别效果最优,并且在聚类三中还体现出了不同亚环境的分类

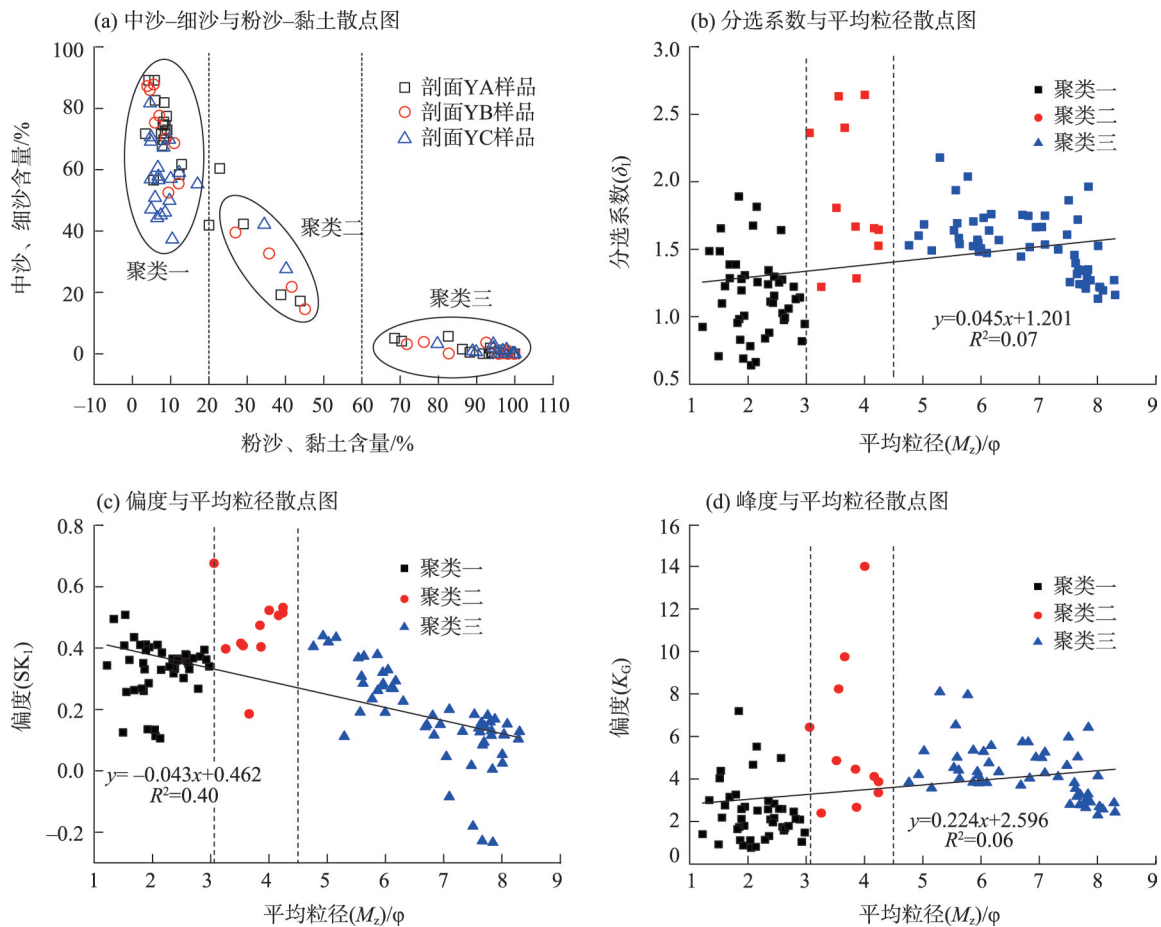


图 7 基于环境敏感组分和粒度参数的雅丹沉积环境聚类示意图

Fig. 7 Schematic diagram of yardang sedimentary environment clustering based on environmentally sensitive components and grain-size parameters

聚集特征。

## 4 结论

本文以雅丹地层沉积物粒级级配、粒度频率分布曲线和粒度参数分析为基础,通过沉积环境敏感组分提取、环境识别和粒度参数验证等研究,对敦煌雅丹地层沉积物的粒度特征及其沉积环境指示意义进行了定量解读,主要结论如下:

(1) 敦煌雅丹地层沉积物粒径组成以粉沙为主,平均含量分别为41.08%(YA)、36.82%(YB)和35.41%(YC),自东向西含量逐渐减少,并含有较高比重的粗沙组分,空间变化趋势与粉沙相反,这与前人对察尔汗盐湖、罗布泊和阿奇克谷地雅丹地貌的研究结果有一定的差别,这可能与敦煌雅丹地貌复杂多样的搬运沉积过程有关。

(2) 雅丹地层沉积物粒径组成和粒度参数在剖面中的曲线变化特征显示,剖面沉积段物质以粗(中沙、细沙为主)细(粉沙、黏土为主)旋回变化为特征,反映了营力条件的变化和发育阶段的不同,其中两组旋回之间的交界面与雅丹三级阶梯交界面高度相吻合,因此,由旋回沉积所组成的沉积层序结构可能是导致雅丹阶梯形态发育的根本原因,而后期的差异性侵蚀是控制这一过程的主要因素。

(3) 根据雅丹沉积物粒度组成特征、频率曲线对比分析以及粒度参数分异研究,可知雅丹地层是不同沉积环境和动力机制下形成的多种沉积物混杂堆积的结果,主要为风成、河流和湖泊环境交替沉积的结果,其中河流与湖泊沉积环境的亚环境类型更是复杂多样,亟待开展深入研究。与此同时,该结果也进一步验证了中沙-细沙含量、粉沙-黏土含量、平均粒径以及偏度作为雅丹沉积环境有效判别指标的可靠性,这对于雅丹沉积环境判别研究具有重要的理论意义。

## 参考文献(References)

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [Wu Zheng. Geomorphology of wind-drift sands and their controlled engineering[M]. Beijing: Science Press, 2003. ]
- [2] 何清, 杨兴华, 霍文, 等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 18–22. [He Qing, Yang Xinghua, Huo Wen, et al. Characteristics of sand granularity from Kumtag Desert and its environmental significance[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 18–22. ]
- [3] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [Dong Zhibao, Su Zhizhu, Qian Guangqiang, et al. Aeolian geomorphology of the Kumtagh Desert[M]. Beijing: Science Press, 2011. ]
- [4] Liu B, Qu J, Ning D, et al. Grain-size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert[J]. Aeolian Research, 2014, 13: 1–6.
- [5] Gutiérrez-Elorza M, Desir G, Gutiérrez-Santolalla F. Yardangs in the semiarid central sector of the Ebro Depression (NE Spain)[J]. Geomorphology, 2002, 44(1): 155–170.
- [6] 李继彦, 董治宝, 李恩菊, 等. 察尔汗盐湖雅丹地貌沉积物粒度特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1187–1192. [Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju, et al. Grain-size characteristics of the deposits from yadang landforms in the Charhan Salt Lake area[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1187–1192. ]
- [7] 邵学敏, 董治宝, 段争虎, 等. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 79–85. [Gao Xuemin, Dong Zhibao, Duan Zhenghu, et al. Grain-size characteristics of long ridge yardangs in the northwestern Qaidam Basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(2): 79–85. ]
- [8] 林桂权, 林永崇, 王雪萍. 新疆罗布泊地区白龙堆雅丹地貌形态特征及成因研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1309–1316. [Lin Guiquan, Lin Yongchong, Wang Xueping. Morphological characteristics and genesis of Bailongdui yardang landforms in Lop Nur, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1309–1316. ]
- [9] Dong Z, Lü P, Lu J, et al. Geomorphology and origin of yardangs in the Kumtagh Desert, northwest China[J]. Geomorphology, 2012, 139: 145–154.
- [10] 夏训诚. 罗布泊地区雅丹地貌的成因[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Xia Xuncheng. The cause analysis of yardangs in the Lop Nur[M]. Beijing: Sciences Press, 1987. ]
- [11] 郑本兴, 张林源, 胡孝宏. 玉门关西雅丹地貌的分布和特征及形成时代问题[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 40–46. [Zheng Benxing, Zhang Linyuan, Hu Xiaohong. Distribution and characteristics of yardang landform and its formation period, west of Yumenguan, Gansu[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 40–46. ]
- [12] 屈建军, 郑本兴, 俞祁浩, 等. 罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠形成的关系[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 294–300. [Qu Jianjun, Zheng Benxing, Yu Qihao, et al. The yardang landform of Aqik Valley in the east of Lop-Nor and its relationship with the evolution of the Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 294–300. ]
- [13] 杨更. 新疆雅丹地貌分布特征浅析[J]. 四川地质学报, 2009, 29(增刊 2): 286–290. [Yang Geng. On distribution of the yardang in Xinjiang[J]. Acta Geologica Sichuan, 2009, 29(Suppl. 2): 286–290. ]
- [14] 牛清河, 屈建军, 李孝泽, 等. 雅丹地貌研究评述与展望[J]. 地球科学进展, 2011, 26(5): 516–527. [Niu Qinghe, Qu Jianjun, Li Xiaozhe, et al. Review and prospect of yardang landforms research [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(5): 516–527. ]

- [15] 王彦洁, 武法东, 李秀明, 等. 甘肃敦煌雅丹地貌沉积物常量元素地球化学特征及指示意义[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 163–169. [Wang Yanjie, Wu Fadong, Li Xiuming, et al. Geochemical features of macro elements in yardang sediments in Dunhuang and the indicative meanings[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 163–169. ]
- [16] Liang X L, Niu Q H, Qu J J, et al. Applying end-member modeling to extricate the sedimentary environment of yardang strata in the Dunhuang Yardang National Geopark, northwestern China[J]. Catena, 2019, 180: 238–251.
- [17] 韩晋芳, 武法东, 蔡胤璐. 敦煌雅丹沉积物中重矿物特征及其物源指示意义[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(4): 137–143. [Han Jinfang, Wu Fadong, Cai Yinlu. Heavy mineral characteristics and its implication for provenance of yardang sediments in Dunhuang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(4): 137–143. ]
- [18] 牛清河, 屈建军, 安志山. 甘肃敦煌雅丹地质公园区风蚀气候侵蚀力特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 1–5. [Niu Qinghe, Qu Jianjun, An Zhishan. Characteristic of wind erosion climatic erosivity in Dunhuang Yardang Geo-park of Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 37(3): 1–5. ]
- [19] Zhao H, Li G, Sheng Y, et al. Early-middle Holocene lake-desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 331: 31–38.
- [20] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3–26.
- [21] Folk R L. A review of grain-size parameters[J]. Sedimentology, 1966, 6(2): 73–93.
- [22] Sun D, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. Sedimentary Geology, 2002, 152: 263–277.
- [23] 董李. 罗布泊雅丹地貌沉积物特征及成因分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2013. [Dong Li. The sedimentary characteristics and cause analysis of yardang in Lop Nur[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2013. ]
- [24] Wang Y, Wu F, Zhang X, et al. Formation and evolution of yardangs activated by Late Pleistocene tectonic movement in Dunhuang, Gansu Province of China[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(8): 1603–1614.
- [25] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Research, 1969, 39(3): 1074–1106.
- [26] Ghosh J K, Mazumder B S. Size distribution of suspended particles-unimodality, symmetry and lognormality[J]. Statistical Distributions in Scientific Work, 1981, 6: 21–32.
- [27] Liu B, Qu J, Ning D, et al. Grain-size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert[J]. Aeolian Research, 2014, 13: 1–6.
- [28] Zhang X, Zhou A, Zhang C, et al. High-resolution records of climate change in arid eastern Central Asia during MIS 3 (51600–25300 cal a BP) from Wulungu Lake, north-western China[J]. Journal of Quaternary Science, 2016, 31(6): 577–586.
- [29] 李开封, 穆桂金, 徐立帅, 等. 塔里木河干流古河道表层沉积物粒度特征及其意义[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 161–164. [Li Kaifeng, Mu Guijin, Xu Lishuai, et al. Grain size characteristics and their significance for surface sediment of paleochannels along main stream of Tarim River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 161–164. ]
- [30] 张志高, 张宏亮, 刘青利, 等. 河西走廊不同类型地表沉积物粒度研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 95–100. [Zhang Zhigao, Zhang Hongliang, Liu Qingli, et al. Particle size analysis of surface sediments and its significance in Hexi Corridor of China[J]. Yellow River, 2015, 37(7): 95–100. ]
- [31] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土, 沙漠沙, 湖泊, 河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 343–351. [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediment in some areas of northern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 343–351. ]
- [32] Vandenberghe J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. Earth- Science Reviews, 2013, 121: 18–30.
- [33] Liu X, Sun Y, Vandenberghe J, et al. Palaeoenvironmental implication of grain-size compositions of terrace deposits on the western Chinese Loess Plateau[J]. Aeolian Research, 2018, 32: 202–209.
- [34] 唐进年. 库姆塔格沙漠沉积物特征与沉积环境研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018. [Tang Jinnian. Study on sediment characteristics and depositional environment in Kumtagh Desert [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Sciences, 2018. ]
- [35] Sun D, Su R, Bloemendal J, et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the east Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 264(1–2): 39–53.
- [36] Li Z, Wei Z, Dong S, et al. The paleoenvironmental significance of spatial distributions of grain size in groundwater-recharged lakes: A case study in the hinterland of the Badain Jaran Desert, north-west China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(2): 363–372.
- [37] 贺振杰, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 哈萨克斯坦巴尔喀什湖沉积物粒度特征及其对区域环境变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1317–1327. [He Zhenjie, Ma Long, Abuduwaili Jilili, et al. Grain-size characteristics of lacustrine sediments in Balkhash Lake, Kazakhstan and its response to regional environmental changes[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1317–1327. ]
- [38] Vandenberghe J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. Earth- Science Reviews, 2013, 121: 18–30.



## Grain-size characteristics of yardang strata sediment in the Dunhuang Yardang National Geopark, northwest China

LIANG Xiaolei<sup>1</sup>, ZHAI Xiaohui<sup>1</sup>, NIU Qinghe<sup>2</sup>, HU Zihao<sup>3</sup>,  
WANG Tianhu<sup>4</sup>, LIU Wancheng<sup>4</sup>

(1. Department of Management, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. Dunhuang Gobi and Desert Research Station/Gansu Center for Sand Hazard Reduction and Engineering and Technology/Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. Dunhuang Yardang Scenic Area Service Center, Jiuquan 736200, Gansu, China)

**Abstract:** The yardang strata is the material manifestation of the sedimentary system before the yardang landform developed. It collects a large amount of data about the deposition process, and sediment analysis is the foundation for interpreting its key findings. The research object in this paper is the Dunhuang yardang landforms in the Dunhuang Yardang Geopark, Gansu Province of northwest China and it is a preliminary study on the grain-size characteristics of the exposed strata sediments. The results indicated that: (1) The grain-size composition of Dunhuang yardang strata sediments is dominated by silt, with an average content of 41.08% (profile YA), 36.82% (profile YB), and 35.41% (profile YC), and its content decreases from east to west. It also contains coarse sand components with higher specific gravity, and the spatial change trend is the inverse of that of silty sand. (2) There are considerably vertical changes in the grain-size composition and parameters of the yardang strata, which are characterized by the alternation of coarse sand (primarily medium and fine sand) and fine sand (mainly silt and clay). Meanwhile, the interface is highly consistent with the shape of yardang's three-level ladder. (3) The yardang stratum is the result of the mixed accumulation of various sediments formed under different sedimentary environments and dynamic mechanisms. It is primarily the result of alternate aeolian, fluvial, and lacustrine deposition. The subenvironmental types of fluvial and lacustrine sedimentary environments are the most complex and diverse, necessitating extensive research.

**Key words:** yardang strata; sediment; grain-size analysis; grain-size frequency distribution curve; grain-size parameter